

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.017

变形介质储层压力恢复试井曲线特征

张 璋,何顺利

(中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

摘 要:针对深层高压、致密低渗和裂缝性油气藏介质变形对储层物性影响显著的特点,建立了变形介质储层压力恢复试井理论模型。定义了表征渗透率变化的拟压力函数对方程进行拟线性化处理,并利用数值方法计算得到了变形介质储层不稳定试井典型曲线,对比分析了介质变形对典型曲线特征的影响。变形介质储层压降试井和压力恢复试井曲线特征明显不同。径向流阶段,压降试井和压力恢复试井导数值均高于 0.5;压力降落试井压力导数曲线随生产时间逐渐上升,且渗透率模量越大,压力曲线与压力导数曲线的距离越小;压力恢复试井压力导数曲线随关井时间逐渐下落,且渗透率模量越大,压力曲线与压力导数曲线的距离越大。生产时间越长,压降曲线与压力恢复曲线差别越明显,叠加原理不再适用于变形介质储层。

关键词:变形介质;应力敏感;拟压力;压力降落试井;压力恢复试井

中图分类号:TE348

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)11-108-07

Pressure buildup behavior in deformable medium formation

ZHANG Zhang, HE Shunli

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract:Based on the fact that formation properties of deep high pressure reservoirs, low permeability tight reservoirs, and naturally fractured reservoirs are trend to be affected by the variation of effective stress, a buildup test model is established for deformable medium reservoir. By defining a pseudo function, the formulations of the model are linearized partially, and numerical method is used to solve the problems. Typical curves of pressure transient tests are obtained and analyzed on double logarithm plots. Both pressure curves and pressure derivative curves of deformable medium formation are significantly different between drawdown and buildup cases. During radial flow period, the pressure derivative curves of drawdown test goes upwards gradually with the duration of production, and the greater is the permeability modulus, the shorter is the distance between the pressure curves and the pressure derivative curves. While as for buildup test, the pressure derivative curves goes downwards gradually with duration of shut-in, and the greater is the permeability modulus, the greater is the distance between the pressure curves and the pressure derivative curves. The difference between pressure drawdown and pressure buildup curves becomes more obvious as production time increasing. Thus, the principle of superposition cannot be used to pressure buildup analysis in deformable formation.

Key words:deformable medium; stress-sensitive; pseudo pressure; drawdown test; buildup test

收稿日期:2013-06-02

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05009-004)

作者简介:张璋(1985-),男,中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事低渗透油藏试井理论方面的研究工作。

何顺利(联系人),男,中国石油大学(北京)教授,博士生导师,(E-mail) zhanghl@cup.edu.cn.

近年来,中国大量投入开发西部油田,开发深层高压、致密低渗和裂缝性油气藏逐渐成为石油工业的重要目标。研究表明,在这些油气藏中介质变形引起的储层物性变化更加明显,会严重影响其开发生产动态^[1]。必须正确认识该类储层的渗流规律和油藏特征,才能给出合理的产能评价和预测,制定相应的开发方案。

不稳定试井是认识和评价油气藏特征的重要手段。自上世纪 60 年代以来,国内外众多学者针对变形介质油气藏,在实验研究基础上发展了变形介质储层试井理论,研究了储层物性变化情况下的试井压力响应特征。前苏联石油工作者^[2]在线弹性渗流理论上建立了弹性介质渗流数学模型,最先研究了渗透率和孔隙度变化对油气井生产动态的影响。Raghavan 等^[3]综合考虑介质变形引起的储层厚度、渗透率和孔隙度的变化,建立了变形介质储层不稳定渗流数学模型,并进行数值求解,较早研究了定产条件下的变形介质储层压降曲线特征。Samaniego^[4-5]将 Raghavan 所建立的模型推广到压力恢复试井、注入试井和压力回落试井分析中,并提出了相应的试井曲线分析和解释方法;其后该学者^[6]又基于 Warren-Root 模型建立了考虑应力敏感的天然裂缝性储层试井模型。Pedrosa 和 Kikani 等^[7-8]在常规渗流方程中引入渗透率模量,将渗透率表示为孔隙压力的指数函数,利用摄动技术最先给出了变形介质储层一阶和二阶近似点源解,并研究了不同渗透率模量对试井分析曲线的影响。Celis 等^[9]将 Pedrosa 的这种方法应用到了裂缝性油藏,给出了无限大地层和定压边界地层的压降曲线和压力恢复曲线。Zhang 等^[10]也在 Pedrosa 工作基础上,分别建立了考虑单参数渗透率、分段渗透率和双参数渗透率的渗流模型,应用迭代方法和数值方法研究了压降曲线和压力恢复曲线特征。以上学者的研究均为常规半对数或双对数压力曲线特征,并没有分析介质变形引起的压力导数的变化,在模型诊断和流态划分方面存在不足。90 年代后期,Chin 等^[11-12]、Pinzon 等^[13]、Osorio 等^[14]和 Tao^[15]等学者开始将地质力学和渗流力学相结合,建立单相流固耦合渗流数学模型,来研究介质变形对试井曲线的影响。但由于其求解难度大,涉及的力学参数众多,目前并未得到广泛应用。国内宋付权、苏玉亮、同登科、孙贺东、姚军、刘曰武等众多学者^[16-28]针对不同油藏类型和问题,也分别建立了相应的变形介质储层渗流数学模型,并对试井压力响应特征进行了理论分析,但都为压力降落试井分析,对关井恢复的压

力及压力导数双对数曲线特征尚未研究。

由于压降试井产量难以控制,矿场常用的不稳定试井方法为关井压力恢复试井。笔者在前人实验数据及理论研究基础上,建立了变形介质储层压力恢复试井理论模型,并引入考虑渗透率变化的拟压力函数来简化问题,最终通过有限差分数值计算得到了变形介质储层现代试井解释典型曲线,在此基础上对比分析了变形介质储层压降试井和压力恢复试井曲线特征。

1 变形介质储层试井理论模型

圆形地层中心一口直井是最基础的试井模型,本文以此类模型说明问题。对于变形介质储层,结合前人的实验研究,并考虑到实际情况做出如下假设:1)地层为水平等厚油藏,忽略介质变形引起的地层厚度变化;2)油井贯穿整个储层以定产量 q 生产, t_p 时刻关井;3)原始条件下地层各点压力相等为 p_i ;4)地层内为单相微可压缩牛顿流体做平面径向流动;5)流体流动满足达西定律,忽略重力和毛管力的影响;6)介质变形引起地层渗透率随孔隙压力变化;7)介质变形造成的地层孔隙度变化不明显。

考虑介质变形后,达西定律可写为:

$$\mathbf{v} = - \frac{3.6 \times 10^{-3} k(p)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

由质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,可得到变形介质油藏径向渗流数学控制方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{k(p)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right] = \frac{1}{3.6 \times 10^{-3} \varphi_i c_t} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

初始条件为:

$$p(r, 0) = p_i \quad (3)$$

内边界定产条件为:

$$\left[\frac{k(p)hr}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right]_{r=r_{we}} - 44.2C \frac{dp_w}{dt} = 1.842(1 - S_i)qB_o \quad (4)$$

式中:

$$S_i = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq t_p \\ 1 & t > t_p \end{cases} \quad (5)$$

外边界条件为:

$$p(r = \infty, t) = p_i (\text{无限大}), \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_e} = 0 (\text{封闭}), \quad (7)$$

$$p(r = r_e, t) = p_i (\text{定压}). \quad (8)$$

以上式中: \mathbf{v} 为流体渗流速度, m/h; k 为地层有效渗透率, mD; μ 为流体粘度, mPa·s; p 为地层压力, MPa; φ_i 为地层孔隙度, 小数; C_t 为综合压缩系数, 1/MPa; C 为井筒储集系数, m³/MPa; B_o 为流体体

积系数; t 为生产时间, $h; q$ 为油井产量, m^3/d ; h 为地层有效厚度, m ; r 为距离, m ; r_{we} 为井筒等效半径, m ; r_e 为油藏半径, m ; 下标 i 表示原始状态。

式(2)~(8)构成了描述变形介质油藏一口直井的基本渗流数学模型。渗流控制方程具有极强的非线性, 很难得到完整的解析解。

2 变形介质储层试井模型求解

只有确定了地层渗透率与孔隙压力的关系才能对式(2)进行求解。在渗透率的处理上, Pedrosa^[7]总结了前人的实验结果, 提出了渗透率模量的概念用以表征渗透率随孔隙压力的变化:

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial p} \text{ 或 } k(p) = k_i e^{\alpha(p-p_i)}; \quad (9)$$

并定义函数:

$$p_D = -\frac{1}{\alpha_D} \ln(1 - \alpha_D \eta), \quad (10)$$

利用正则摄动法得到了近似点源解。该方法在国内外得到了广泛的应用^[8-9, 18-20, 22, 28]。式中: α 为渗透率模量, $1/(\text{MPa})$; α_D 为无量纲渗透率模量。

国内宋付权等^[16, 21]、苏玉亮等^[17]和刘曰武等^[25], 同样引入渗透率模量概念, 并定义函数

$$U = e^{\alpha(p-p_i)}, \quad (11)$$

将压力随时间变化的不稳定渗流方程转化为渗透率随时间变化的不稳定方程进行求解。

以上 2 种方法是等效的, 且仅适用于渗透率随压力呈指数式变化的情况。笔者通过引入拟压力函数, 来对渗透率进行处理。

为简便起见, 记 $k(p) = k_i f(p)$, $f(p)$ 可为值在 0 到 1 之间的任意函数。定义拟压力函数为

$$m(p) = \int_0^p f(p) dp, \quad (12)$$

式中: $k(p)$ 为随孔隙压力变化的渗透率, mD ; k_i 为地层初始渗透率, mD 。

将式(12)带入式(2)并简化可得

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial m}{\partial r} \right) \right] = \frac{\varphi_i \mu c_i}{3.6 \times 10^{-3} k_i} \frac{1}{f(p)} \frac{\partial m}{\partial t}. \quad (13)$$

拟压力大大弱化了原渗流方程的非线性。若已知 $f(p)$, 可通过式(12)建立拟压力 $m(p)$ 与压力 p 的关系, 给定初始条件和边界条件后对方程(13)进行迭代求解可得到拟压力 $m(p)$ 随时间的变化, 然后根据拟压力与压力的关系得到相应的压力值。可见, 拟压力在处理渗透率变化问题上具有普适性, 可用来表征随压力任意变化的渗透率。

定义如下无量纲变量:

$$p_D = \frac{k_i h}{1.842 q \mu B_o} (p_i - p); t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} k_i t}{\varphi_i \mu c_i r_w^2};$$

$$m_D = \frac{k_i h}{1.842 q \mu B_o} [m(p_i) - m(p)]; T_D = \frac{t_D}{C_D};$$

$$r_D = \frac{r}{r_w e^{-s}}; r_{eD} = \frac{r_e}{r_w e^{-s}}; C_D = \frac{0.159 C}{h \varphi_i c_i r_w^2}$$

得到无量纲试井模型:

$$C_D e^{2s} \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial m_D}{\partial r_D} \right) = \frac{1}{f(p_D)} \frac{\partial m_D}{\partial T_D}, \quad (14)$$

$$m_D(r_D, 0) = 0, \quad (15)$$

$$\frac{1}{f(p_D)} \frac{dm_{wD}}{dT_D} - \left(r_D \frac{\partial m_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 - S_i, \quad (16)$$

$$m_D(\infty, T_D) = 0, \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial m_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=r_{eD}} = 0, \quad (18)$$

$$m_D(r_D = r_{eD}, T_D) = m_D(p_i). \quad (19)$$

为便于对比分析, 在研究时将渗透率表示为孔隙压力的指数式函数(式(9)), 以渗透率模量的大小对比介质变形引起的储层物性应力敏感性的强弱。此时, 式(14)中的 $f(p_D)$ 可直接表示为:

$$f(p_D) = e^{-\alpha_D p_D}. \quad (20)$$

若以笔者定义的拟压力可表示为:

$$f(p_D) = 1 - \alpha_D m_D. \quad (21)$$

式中:

$$\alpha_D = \frac{1.842 q \mu B_o}{k_i h} \alpha, \quad (22)$$

为无量纲渗透率模量。

建立点中心网格系统, 对式(14)~(19)构成的渗流方程组进行差分离散, 求解得到压力降落和压力恢复试井双对数曲线。

3 无限大变形介质储层试井曲线

3.1 压力降落试井曲线特征

根据所建立的变形介质储层试井理论模型, 计算得到了无限大外边界条件下变形介质储层压降试井典型曲线, 如图 1、2 所示。Pedrosa^[7]指出对于大多数储层, 无因次渗透率模量不会超过 0.3, 这里取 0~0.1 进行研究。

图 1 为不同渗透率模量对应的压降典型曲线。可以看出: 1) 随渗透率模量增大, 变形介质储层压降曲线及压力导数曲线均向上偏离非变形介质储层; 2) 渗透率模量越大, 压力曲线与压力导数曲线的距离越小; 3) 径向流期压力导数曲线随生产时间逐渐上升, 表现出了地层系数逐渐降低或近井区存在不渗透边界的特征。从导数曲线可以看出典型曲线不同流动阶段的特征: 1) 纯井筒储集阶段, 压力和压力导数曲线的斜率均为 1.0, 不受介质变形的影响;

2)过渡段,随渗透率模量增大,过渡段峰值逐渐增大,且出现时间推迟,但影响并不明显;3)径向流阶段,导数曲线与常规储层存在明显区别,导数值大于 0.5,且随时间逐渐增加。

图 2 为不同 $C_D e^{2S}$ 值对应的压降典型曲线。可以看出:径向流阶段,不同 $C_D e^{2S}$ 值对应的压力导数值均高于 0.5,且 $C_D e^{2S}$ 值越大,压力导数值也越大,上翘越明显。 $C_D e^{2S}$ 值的大小表明油井的改善程度,其值越小,油井改善程度越高。图 2 说明了油井改善程度越低,试井曲线受介质变形的影响越明显。

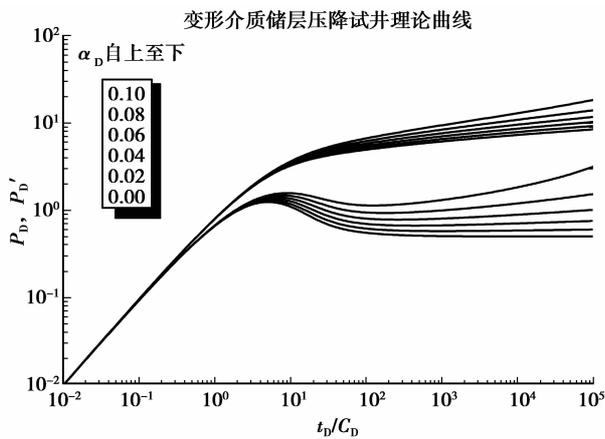


图 1 无限大变形介质储层压降曲线 ($C_D e^{2S} = 100$)

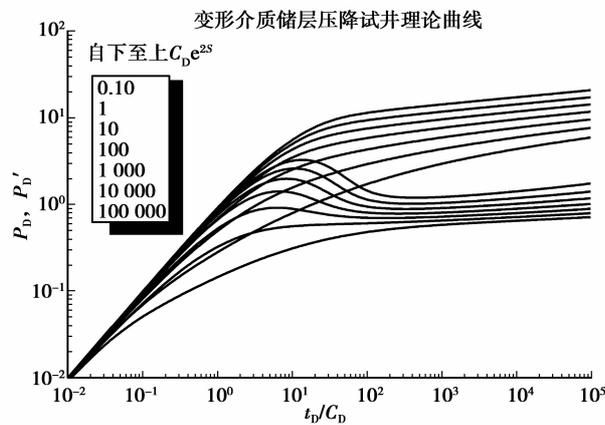


图 2 无限大变形介质储层压降曲线 ($\alpha_D = 0.06$)

综合图 1 和图 2 可以推断出,该类储层试井数据若用常规模型进行解释,地层系数和表皮系数解释结果可能存在异常。

3.2 压力恢复试井曲线特征

根据所建立的变形介质储层试井理论模型,计算得到了无限大外界边界条件下变形介质储层压力恢复试井典型曲线,如图 3、4 所示。

图 3 为不同渗透率模量对应的压力恢复典型曲线。可以看出:1)随渗透率模量增大,变形介质储层

压力恢复曲线及压力导数曲线均向上偏离非变形介质储层;2)渗透率模量越大,压力曲线和压力导数曲线的距离越大;3)径向流期压力导数曲线随关井时间逐渐下落,表现出了地层系数逐渐增加的特征。从导数曲线可以看出典型曲线不同阶段的特征:1)纯井筒储集阶段,压力和压力导数曲线的斜率均为 1.0,不受介质变形的影响;2)过渡段,随渗透率模量增大,过渡段峰值明显增大,且出现时间延迟;3)径向流阶段,导数曲线值略高于 0.5,且随时间逐渐减小至 0.5。

图 4 为不同 $C_D e^{2S}$ 值对应的压力恢复典型曲线。可以看出:无限径向流阶段,不同的 $C_D e^{2S}$ 值对应的压力导数值均高于 0.5;后期不同 $C_D e^{2S}$ 值对应的导数曲线合并为负斜率的直线。

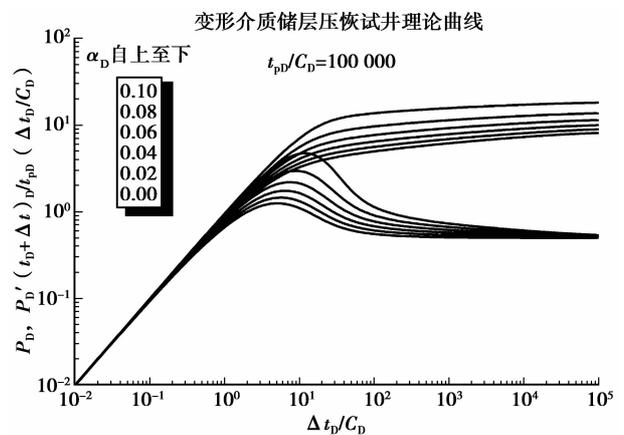


图 3 无限大变形介质储层压恢曲线 ($C_D e^{2S} = 100$)

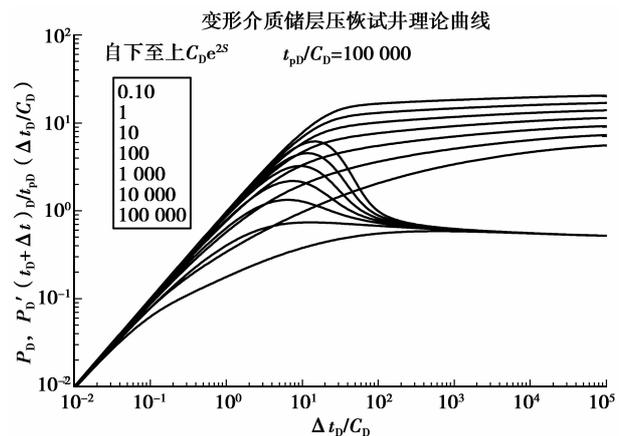


图 4 无限大变形介质储层压恢曲线 ($\alpha_D = 0.06$)

3.3 生产时间对压力恢复曲线的影响

在常规储层中,压力恢复曲线是根据叠加原理得到的:

$$p_{BU}(\Delta t_D) = p_{wD}(t_{pD}) - p_{wD}(t_{pD} + \Delta t_D) + p_{wD}(\Delta t_D). \quad (23)$$

式中： p_{BU} 为无因次压力恢复值； p_{wD} 为无因次压力降落值； t_{pD} 和 Δt_D 分别为无因次生产时间和关井时间。

由式(23)可知，当生产时间 t_{pD} 远大于关井时间 Δt_D 时有：

$$p_{BU}(\Delta t_D) \approx p_{wD}(\Delta t_D) \quad (24)$$

即压力恢复曲线与压降曲线重合，且由于

$$p_{wD}(t_{pD}) < p_{wD}(t_{pD} + \Delta t_D), \quad (25)$$

Δt_D 较大时，压力恢复曲线将位于压降曲线下方。

对于变形介质储层，由图 5 为可以看出以下特征：1) 在生产时间 t_{pD} 远大于关井时间 Δt_D 时，压力

恢复曲线与压降曲线不再重合，且生产时间越长，差别越明显；2) 压力恢复曲线始终高于压降曲线；3) 过渡流阶段，压力恢复导数曲线峰值高于压降导数曲线；4) 径向流阶段，压力恢复导数曲线低于压降导数曲线，且压力恢复导数曲线呈下落特征，压降导数曲线呈上升特征。该图说明了在生产过程中，介质变形造成了渗透率损伤，且损伤范围和程度随生产时间增大，导致压降曲线与压力恢复曲线差别逐渐显著。这也说明，叠加原理不再适用于变形介质储层，若用常规储层试井理论解释变形介质储层试井数据，压降解释结果将与压力恢复解释结果不一致。

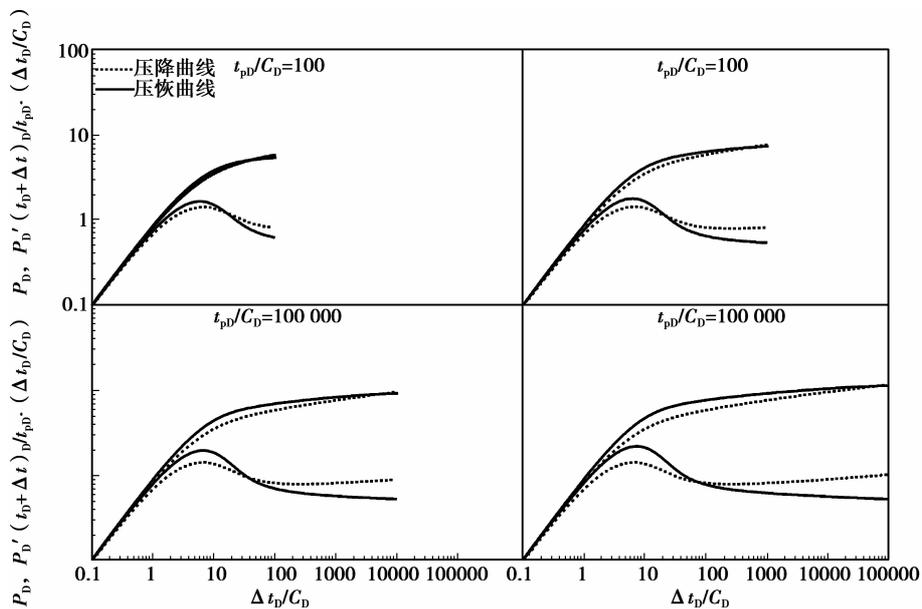


图 5 变形介质储层压降与压恢曲线特征对比 ($\alpha_D = 0.06$)

4 圆形封闭变形介质储层试井曲线

4.1 压力降落试井曲线特征

图 6 为不同半径圆形封闭地层对应的压力降落典型曲线。可以看出：1) 变形介质储层压力降落试井对边界距离的反映时间基本与非变形介质储层相同，这说明在生产阶段压力波的传播速度并不受介质变形的影响；2) 边界影响阶段，变形介质储层压力和压力导数曲线上翘程度加大，斜率大于 1，压力曲线与导数曲线不再重合。

4.2 压力恢复试井曲线特征

图 7 为圆形封闭地层对应的压力恢复曲线。可以看出：1) 变形介质储层压力恢复试井对边界距离的反映时间基本与非变形介质储层相同；2) 相同的

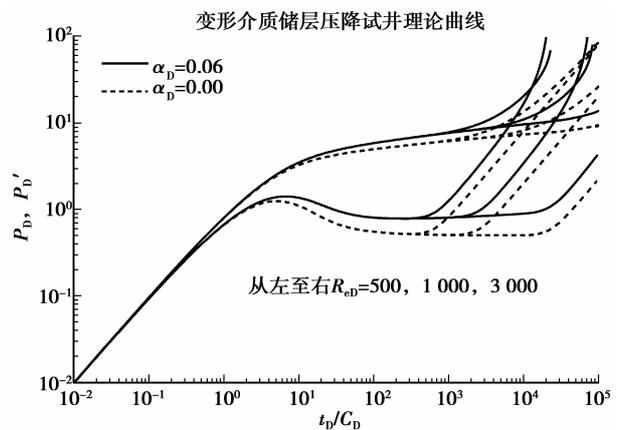


图 6 圆形封闭变形介质储层压降曲线

生产时间，变形介质储层压力恢复曲线和导数曲线高于非变形介质储层。

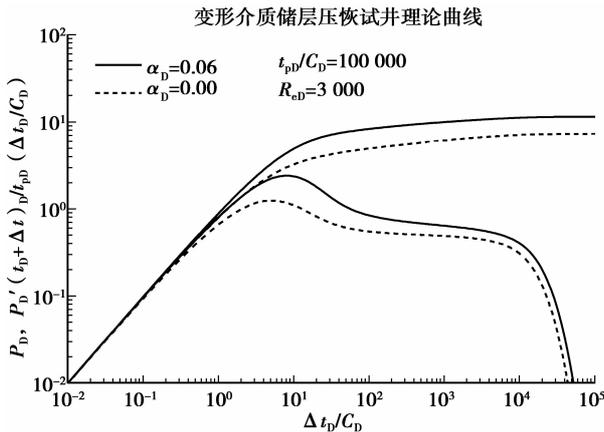


图 7 圆形封闭变形介质储层压恢曲线

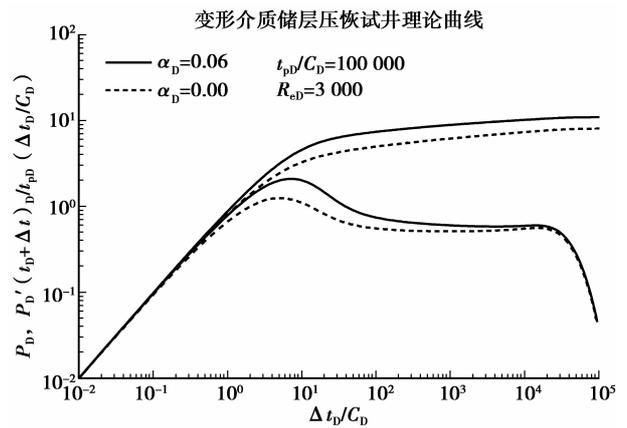


图 9 圆形定压变形介质储层压恢曲线

5 圆形定压变形介质储层试井曲线

5.1 压力降落试井曲线特征

图 8 为不同半径圆形定压边界地层对应的压力降落典型曲线。可以看出:1)变形介质储层压力降落试井对边界距离的反映时间基本与非变形介质储层相同,这说明在生产阶段压力波的传播速度并不受介质变形的影响;2)边界影响阶段,变形介质储层压力和压力导数曲线与非变形介质储层曲线特征一致。

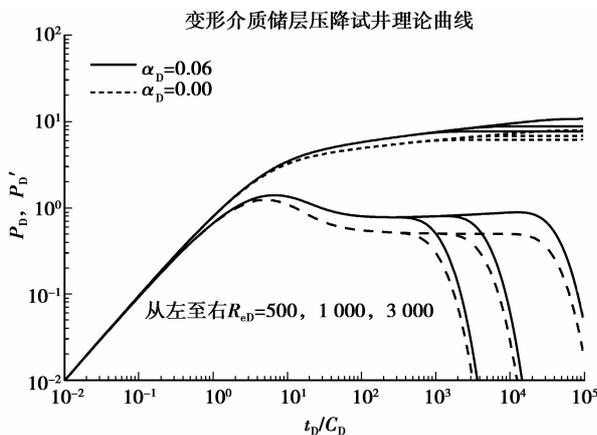


图 8 圆形定压变形介质储层压降曲线

5.2 压力恢复试井曲线特征

图 9 为圆形定压边界地层对应的压力恢复曲线。可以看出:1)变形介质储层压力恢复试井对边界距离的反映时间基本与非变形介质储层相同;2)相同的生产时间,在边界未影响阶段,变形介质储层压力恢复曲线和导数曲线高于非变形介质储层,在边界影响阶段,变形介质储层压力恢复导数曲线与非变形介质储层重合。

6 结 论

建立了变形介质储层压力恢复试井理论模型,定义了考虑应力敏感的拟压力函数对问题进行简化,通过有限差分方法计算得到无限大地层和圆形有界地层的压降试井和压力恢复试井理论曲线,并进行了对比分析。研究表明:

1)过渡流阶段,随渗透率模量增大,压降试井导数曲线峰值逐渐增大,且出现时间推迟,但影响并不明显;压力恢复试井导数曲线峰值明显增大。

2)径向流阶段,压降试井和压力恢复试井导数值均高于 0.5;压降试井导数曲线随生产时间逐渐上升,且渗透率模量越大,压力曲线与压力导数曲线的距离越小;压力恢复试井压力导数曲线随关井时间逐渐下落,且渗透率模量越大,压力曲线与压力导数曲线的距离越大。

3)生产时间越长,压降曲线与压力恢复曲线差别越明显,叠加原理不再适用于变形介质储层。

4)变形介质储层压力恢复试井对边界距离的反映时间基本与非变形介质储层相同,渗透率应力敏感并未明显影响压力波的传播速度。

参考文献:

- [1] Vairogs J, Hearn C L, Dareing D W, et al. Effect of rock stress on gas production from low-permeability reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1971, 23(9): 1161-1167.
- [2] A. T. 戈尔布诺夫. 异常油田开发[M]. 张树宝,译. 北京:石油工业出版社,1987.
- [3] Raghavan R, Scorer J D T, Miller F G, et al. An investigation by numerical methods of the effect of pressure-dependent rock and fluid properties on well flow tests[J]. Society of Petroleum Engineers Journal,

- 1972,12(3): 267-275.
- [4] Samaniego V F, Brigham W E, Miller F G. An investigation of transient flow of reservoir fluids considering pressure-dependent rock and fluid properties[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1977, 17(2): 141-150.
- [5] Samaniego V F. An investigation of transient flow of reservoir fluids considering pressure-dependent rock and fluid properties [D]. USA: Stanford University, 1975.
- [6] Samaniego V F, Villalobos L H. Transient pressure analysis of pressure-dependent naturally fractured reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2003, 39(1/2):45-56.
- [7] Pedrosa O A. Pressure transient response in stress-sensitive formations [C]//Proceedings of 1986 SPE California Regional Meeting, April 2-4, 1986, Oakland, California, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 1986:203-214.
- [8] Kikani J, Pedrosa O A. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, 1991, 6(3): 379-386.
- [9] Celis V, Silva R, Ramones M, et al. A new model for pressure transient analysis in stress sensitive naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Advanced Technology Series, 1994, 2(1): 126-135.
- [10] Zhang M Y, Ambastha A K. New insights in pressure-transient analysis for stress-sensitive reservoirs [C]// Proceedings of 1994 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 25-28, 1994, New Orleans, Louisiana, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 1994:617-628.
- [11] Chin L Y, Raghavan R, Thomas L K. Full coupled geomechanics and fluid-flow analysis of wells with stress-dependent permeability [C]//Proceedings of 1998 SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, November 2-6, 1998, Beijing, China. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers Journal, 1998:32-45.
- [12] Chin L Y, Raghavan R, Thomas L K. Full coupled analysis of well responses in stress-sensitive permeability [J]. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering, 2000, 3(5): 32-45.
- [13] Pinzon C L, Chen H Y, Teufel L W. Numerical well test analysis of stress-sensitive reservoirs [C]// Proceedings of 2001 SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, May 21-23, 2001, Keystone, Colorado, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [14] Osorio J G, Wills A, Alcalde O R. A numerical model to study the formation damage by rock deformation from well test analysis [C]//Proceedings of 2002 International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, February 20-21, 2002, Lafayette, Louisiana, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [15] Tao Q F. A numerical model of fracture permeability change in naturally fractured reservoirs using a fully coupled displacement discontinuity method [D]. Texas: A&M University, 2010.
- [16] 宋付权, 刘慈群. 变形介质油藏试井分析方法[J]. 油气井测试, 1998, 7(2): 1-5.
SONG Fuquan, LIU Ciqun. Well test analysis method for deformable media reservoir [J]. Well Testing, 1998, 7(2): 1-5.
- [17] 苏玉亮, 栾志安, 张永高. 变形介质油藏开发特征[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 51-55.
SU Yuliang, LUAN Zhian, ZHANG Yonggao. A study on development characteristics for deformed reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 51-55.
- [18] 段永刚, 黄诚, 陈伟, 等. 应力敏感裂缝性油藏不稳态压力动态分析[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(5): 19-22.
DUAN Yonggang, HUANG Cheng, CHEN Wei, et al. Pressure transient analysis for naturally fractured reservoirs with stress sensitivity [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(5): 19-22.
- [19] 同登科, 姜东梅, 陈钦雷, 等. 变形双重介质油藏动态特征[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2001, 25(5): 53-56.
TONG Dengke, JIANG Dongmei, CHEN Qinglei. Dynamic characteristics of reservoir with deformed double-porosity medium [J]. Journal of the University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2001, 25(5): 53-56.
- [20] 王文环. 应力敏感砂岩地层三区复合凝析气藏不稳定试井模型 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 117-119.
WANG Wenhuan. Three-zone composite well test model of condensate gas reservoir in stress-sensitive sandstone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 117-119.
- [21] 宋付权, 李画眉. 变形介质油藏中的不稳定渗流[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(1): 93-98.

- October 20-23, 2008, Calgary, Alberta, Canada.
[S. I.]: Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [11] 张艳玉, 吴晓东, 李洪君, 等. 复杂小断块油藏氮气吞吐数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(1): 83-86.
ZHANG Yanyu, WU Xiaodong, LI Hongjun, et al. Numerical simulation of nitrogen stimulation for complex small fault-block reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(1): 83-86.
- [12] 郭平, 邓垒, 杨学峰, 等. 低渗富含凝析油凝析气藏气井干气吞吐效果评价[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 354-357.
GUO Ping, DENG Lei, YANG Xuefeng, et al. Dry gas huff and puff effect evaluation of gas wells in low-permeable condensate gas reservoir with rich condensate oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 354-357.
- [13] 任双双, 杨胜来, 杭达震. 非纯 CO₂ 对 MMP 和驱油效率影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 249-253.
REN Shuangshuang, YANG Shenglai, HANG Dazhen. Laboratory evaluation of effects of impure CO₂ on MMP and displacement efficiency [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(2): 249-253.
- [14] Firoozabadi A, Aronson A. Visualization and measurement of gas evolution and flow of heavy and light oils in porous media [J]. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation & Engineering, 1999, 2(6): 550-557.
- [15] 苏玉亮, 吴春新, 张琪, 等. 特低渗油藏 CO₂ 非混相驱油特征[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 53-56.
SU Yuliang, WU Chunxin, ZHANG Qi, et al. Characteristics of immiscible CO₂ displacement in extremely low permeability reservoir [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 53-56.

(编辑 郑洁)

(上接第 114 页)

- SONG Fuquan, LI Huamei. The transient flow in deformation reservoir [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(1): 93-98.
- [22] 孙贺东, 张峰, 吕江毅, 等. 应力敏感性油气藏试井分析研究进展[J]. 油气井测试, 2007, 16(3): 1-4.
SUN Hedong, ZHANG Feng, Lü Jiangyi, et al. Advance of well test analysis in stress-sensitive formation [J]. Well Testing, 2007, 16(3): 1-4.
- [23] 孙贺东, 韩永新, 肖香姣, 等. 裂缝性应力敏感气藏数值试井分析[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 270-273.
SUN Hedong, HUAN Yongxin, XIAO Xiangjiao, et al. Numerical well test analysis of stress-sensitive fractured gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 270-273.
- [24] 姚军, 刘顺. 基于动态渗透率效应的低渗透油藏试井解释模型[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 430-433.
YAO Jun, LIU Shun. Well test interpretation model based on mutative permeability effects for low-permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 430-433.
- [25] 刘曰武, 陈维良, 刘清泉. 高压深层裂缝性油气藏中不定常渗流的数值研究[J]. 中国科学 G 辑, 2009, 39(4): 606-616.
LIU Yuewu, CHEN Weiliang, LIU Qingquan. Numerical study on transient flow in the deep naturally fractured reservoir with high pressure [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2009, 39(4): 606-616.
- [26] 王建忠, 姚军, 张凯, 等. 变渗透率模量与双重介质孔隙的压力敏感性[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(3): 80-83.
WANG Jianzhong, YAO Jun, ZHANG Kai, et al. Variable permeability modulus and pressure sensitivity of dual-porosity medium [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(3): 80-83.
- [27] 王建忠, 姚军, 王子胜. 用变渗透率模量分析双重介质油藏压力动态特征[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(3): 288-290.
WANG Jianzhong, YAO Jun, WANG Zisheng. Pressure behavior characteristic analysis of stress-sensitive reservoirs with variable permeability module [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3): 288-290.
- [28] Zhang L H, Guo J J, Liu Q G. A new well test model for stress-sensitive and radially heterogeneous dual-porosity reservoirs with non-uniform thicknesses [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(6): 759-766.

(编辑 郑洁)